



量子点单光子源的光纤耦合

尚向军 李叔伦 马奔 陈瑶 何小武 倪海桥 牛智川

Optical fiber coupling of quantum dot single photon sources

Shang Xiang-Jun Li Shu-Lun Ma Ben Chen Yao He Xiao-Wu Ni Hai-Qiao Niu Zhi-Chuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 087801 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201605

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201605>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

量子点操控的光子探测和圆偏振光子发射

Single photon detection and circular polarized emission manipulated with individual quantum dot

物理学报. 2018, 67(22): 227301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20182049>

InAs/GaAs量子点1.3 μm 单光子发射特性

1.3 μm single photon emission from InAs/GaAs quantum dots

物理学报. 2018, 67(23): 237802 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181592>

光子驱动量子点制冷机

Quantum dot refrigerator driven by photon

物理学报. 2019, 68(22): 220501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191091>

单光子调制频谱用于量子点荧光寿命动力学的研究

Research on fluorescence lifetime dynamics of quantum dot by single photons modulation spectrum

物理学报. 2019, 68(1): 017803 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181797>

耗散耦合腔阵列耦合量子化腔场驱动三能级体系中的单光子输运

Single photon transport by a quantized cavity field driven cascade-type three-level atom in a dissipative coupled cavity array

物理学报. 2017, 66(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.054204>

基于超强耦合量子点-纳米机械振子系统的全光学质量传感

All-optical mass sensing based on ultra-strong coupling quantum dot-nanomechanical resonator system

物理学报. 2019, 68(24): 246302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190607>

量子点单光子源的光纤耦合*

尚向军¹⁾ 李叔伦¹⁾ 马奔¹⁾ 陈瑶¹⁾ 何小武¹⁾ 倪海桥¹⁾²⁾ 牛智川^{1)2)†}

1) (中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

2) (北京量子信息科学研究院, 北京 100193)

(2020年9月28日收到; 2020年12月15日收到修改稿)

半导体量子点在低温下产生谱线细锐的激子发光可制备单光子源. 光纤耦合可避免低温共聚焦装置扫描定位和振动影响, 是实现单光子源即插即用和组件化的关键技术. 在耦合工艺上, 基于微区定位标记发展出拉锥光纤与光子晶体腔或波导侧向耦合、大数值孔径锥形端面光纤与量子点样片垂直耦合等技术; 然而, 上述工艺需要多维度精密调节以避免柔软光纤的畸形弯曲实现对准和高效耦合. 陶瓷插针或石英 V 槽封装的光纤无弯曲且具有大平滑端面, 只要与单量子点样片对准贴合就可保证垂直收光, V 槽封装的排式光纤还可通过盲对粘合避免扫描对准, 耦合简单. 本文在前期排式光纤粘合少对数分布 Bragg 反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 微柱样片实现单光子输出基础上, 经理论模拟采用多对数 DBR 腔提升样片垂直出光和光纤收光效率, 使光纤输出单光子计数率大大提升.

关键词: 量子点单光子源, 光纤耦合, 分布 Bragg 反射镜腔, 垂直出光

PACS: 78.67.Hc, 73.21.La, 78.55.Cr, 42.50.Ar

DOI: 10.7498/aps.70.20201605

1 引言

单光子源是量子信息技术关键元器件. 近年来, 量子光网络成功演示玻色采样量子计算^[1], 波导光量子芯片如 CNOT 门^[2]、波导或微环腔参量下转换光子对源^[3,4]、Mach-Zehnder 干涉型路径纠缠器和波分复用器^[4]、片上 Hong-Ou-Mandel 干涉仪^[5]、铌酸锂波导分路器和光开关^[6]、随机行走器^[7]、集成单光子探测器^[8]、芯片化量子密钥分发 (quantum key distribution, QKD)^[9] 等大量涌现, 大大推动了单光子应用. 制备可与之衔接的单光子源组件尤为重要. 外延半导体单量子点 (single quantum dot, SQD) 是制备单光子源的理想材料, 在低温下稳定且确定性发光、激子谱线细、波长覆盖广、光场耦合系数大、易于外场调控、与半导体微纳工艺兼容, 可集成光学微腔和微透镜、靶眼

环、金属超材料等结构增强光-物质作用并提升出光方向性. GaAs 基 In(Ga)As SQD 波长可覆盖 840—1340 nm^[10]; 可集成 GaAs/AlAs 分布 Bragg 反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) Fabry-Petrot (F-P) 平面腔并刻蚀微柱阵列, 其工艺比光子晶体腔简单; 作为腔镜的 “building block”, GaAs/AlAs 膜系的折射率差小, 可通过精确优化 DBR 对数来折衷优化腔内光场强度 (即 Purcell 效应) 和出光提取效率 (腔输出), 以提高 SQD 出光计数率. 然而, 外延 SQD 只在液氮 77 K 温度以下才能很好发光; 而且其在片上位置随机且发光质量各有差异, 必须对高亮度 SQD 做光谱扫描寻址并优化收光光路效率, 才能收集尽可能多的单光子.

单光子收集通常用共聚焦装置通过针孔空间滤波收集片上微区内的 SQD 荧光, 并通过单色仪

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB2200504, 2018YFA0306100)、国家自然科学基金 (批准号: 61505196) 和中国科学院仪器研制项目 (批准号: YJKYYQ20170032) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zcnitu@semi.ac.cn

或滤光片滤出激子光谱单线. 激光经高倍物镜聚焦后光斑较小 ($2\ \mu\text{m}$), 本身就可选区激发 SQD, 故荧光光路针孔可开大以增加光通量, 甚至可搭建单模光纤引入高斯激光束、多模光纤收集荧光的光纤光路共聚焦. 多模光纤芯径和数值孔径大, 收光效率高, 易调节, 但输出光斑差. 用单模光纤收光虽可输出高斯光束用于后端应用, 但其芯径和数值孔径小, 需要多维度精密调节光斑准直和聚焦以优化收光效率, 调节难度大. 若能将高亮度 SQD 与单模光纤直接近场耦合并固定, 就可避免系统振动/位移影响和重复扫描寻址保持对 SQD 定位, 获得高且稳定的单光子输出, 实现即插即用和组件化; 而且光纤透光率从可见到 $2.5\ \mu\text{m}$ 波段都保持较高, 适于全波段 (特别是 1.30 或 $1.55\ \mu\text{m}$) SQD. SQD 光纤耦合方案有三种, 如图 1 所示. 基于微区定位标记 XY 的拉锥光纤与光子晶体腔或悬空波导侧向耦合, 其理论收光效率最高达 73% ^[11,12]; 大数值孔径锥形端面光纤与 SQD 样片垂直耦合, 其理论收光效率最高达 73% ^[13]; 石英 V 槽封装的排式光纤与 SQD 样片垂直耦合^[14]. 前两种方案都需要多维度精确调节以避免柔软光纤的畸形弯曲实现高效对准耦合; V 槽排纤无弯曲且具有大平滑端面, 只要与 SQD 样片充分贴合就可保证垂直收光, 而且光纤芯径为 $4\text{--}9\ \mu\text{m}$, 对准 SQD 的容差大, 其盲对粘合及光谱筛选操作简单, 可避免光纤陶瓷插针的扫描对准难题. 其收光效率取决于光纤数值孔径和 SQD 出光发散角. 单模光纤数值孔径仅 0.13 , 远小于共聚焦物镜 $0.55\text{--}0.70$, 因此需要集成 DBR 腔来增强 SQD 垂直出光. 之前文献报道用端面镀 DBR 介质膜的裸光纤与集成下 DBR 的 SQD 样片有缝贴合, 由上下 DBR 构成的标准具腔来增强 SQD 垂直出光, 光纤收光效率约 10% ^[15]. 如直接用上下 DBR 构成的 F-P 腔耦合 SQD 结构与光纤粘合, 其收光效率有望提升.

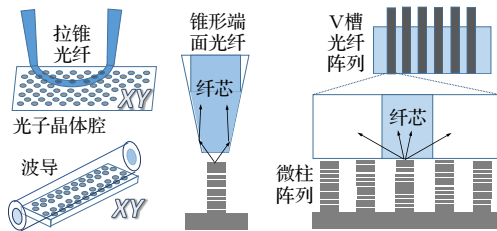


图 1 SQD 光纤耦合方案

Fig. 1. Schemes of fiber coupling with SQDs.

本文在我们之前用 V 槽排式光纤粘接少对数 (上 4 对) DBR 微柱阵列实现 SQD 单光子光纤输出基础上, 通过有限差分域法 (finite difference time domain, FDTD) 模拟优化上 DBR 对数, 提升垂直出光, 并用外延的多对数 (上 16 对) DBR 平面腔样片进行 V 槽排纤盲对粘接, 获得 SQD 光纤耦合样品; 相比上 4 对 DBR 的微柱 SQD 光纤耦合样品, 上 16 对 DBR 的平面腔 SQD 光纤耦合样品的光纤输出单光子计数率大大提升, 符合理论预测; 分别测试了两者在不同温度下的光谱、光子计数率和二阶关联函数 $g^2(\tau)$, 两者 $g^2(\tau)$ 均呈反聚束, 均在约 $70\ \text{K}$ 下与腔模耦合获得干净谱线和较高单光子计数率.

2 FDTD 模拟

采用 FDTD 程序模拟 DBR 微柱的光纤收光效率. 实际光纤的纤芯 ($9\ \mu\text{m}$) 和包层 ($125\ \mu\text{m}$) 直径都远大于微柱, 而且两者折射率差小, 数值孔径仅 0.13 , 要反映其远场全反射, 需要仿真计算的尺寸非常大, 这里不适用. 为了便于仿真模拟, 如图 2(b) 右插图所示, 用直径 $8\ \mu\text{m}$ 、折射率 $n = 1.5$ 的圆柱 (青色区域) 来表示光纤芯径, 其大小超过 FDTD 模拟范围, 其数值孔径角为 A 对应临界全反射角, 其数值孔径 $NA = \sin A = 0.13$; 光纤收光用数值孔径角 A 来定义: 只有在 A 范围内的光场才可通过远场的光纤全反射而被收集, 在 A 范围外的光场最终会倏逝掉, 这样就避免了需另外模拟光纤包层而且模拟尺寸很大的困难, 通过近场 FDTD 模拟估算光纤收光效率. 模拟是在光纤与微柱无间隙贴合、完全对准、SQD 位于微柱正中心的理想情形下进行. 仿真计算只包含单个微柱和光纤, 因为光纤阵列相邻间隔 $127\ \mu\text{m}$, 微柱阵列相邻间隔 $10\ \mu\text{m}$, 足以消除相邻光纤或微柱的影响. 图 2(c) 给出模拟结构示意图, 其中, 微柱 (红蓝相间区域) 由 1λ -GaAs 和上、下 DBR 构成, DBR 的 AlAs (折射率 2.9) 厚度为 $78.2\ \text{nm}$, GaAs (折射率 3.5) 厚度为 $65.3\ \text{nm}$, 即 $\lambda/4$, 下 DBR 为 36 对, 上 DBR 的对数可变, 微柱直径 $C = 2\ \mu\text{m}$, 底部为 GaAs 衬底; 光纤收光用字母 D 命名的时间模拟探测器 (灰色条) 记录, 其大小为微柱直径与光纤数值孔径之和, 即 $C + 2 \times d \times NA$, 其中 d 为该模拟探测器距离微柱表面的间距. 假设 SQD 为单脉冲

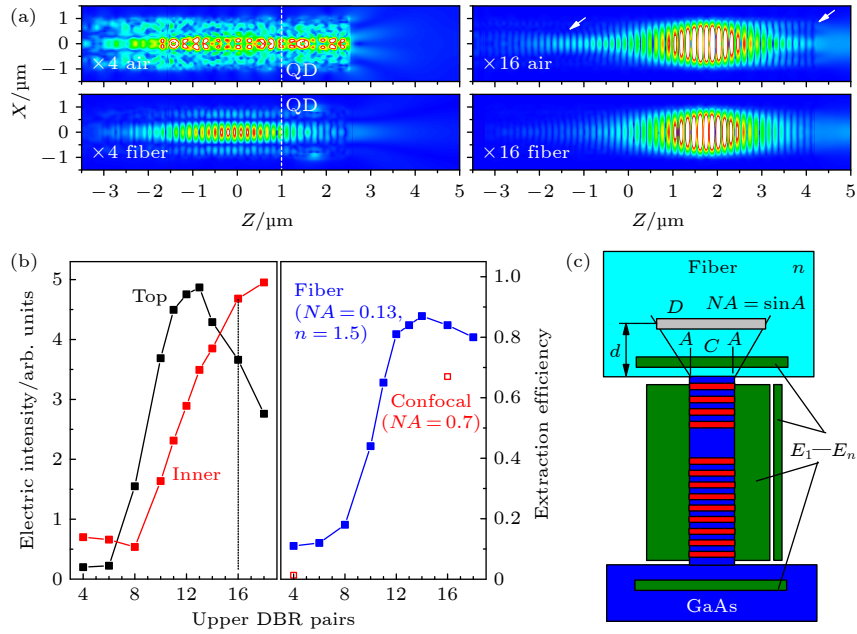


图 2 单模光纤粘合 SQD 微柱的收光模拟 (a) 静态腔场分布; (b) 左: 腔内 (inner) 和顶部 (top) 的静态腔场强度; 右: 光纤提取效率随上 DBR 对数的变化. 同时列出共聚焦收光效率 (空心点) 作比较; (c) 模拟结构示意图
 Fig. 2. Simulation of light collection from single mode fiber-bonded SQD micropillar: (a) Steady cavity field distribution; (b) Left: steady cavity mode intensity inside (inner) or on top of (top) the cavity; right: light extraction efficiency of fiber, as a function of the upper DBR pairs. Red hollow points: that of confocal setup for comparison; (c) schematic of the simulation structure.

激发的电偶极子且其方向平行于衬底, 即腔模光场的方向. 经过足够长时间演化后, 腔内剩余光场即腔模光场; 假设 SQD 发光与腔模光场完美匹配; 用时间模拟探测器 $E_1 - E_n$ (深绿色区域) 记录微柱全方向, 即顶部、底部和侧面的出光功率, 光纤收光效率定义为模拟探测器 D 的收光功率除以模拟探测器 $E_1 - E_n$ 的出光总功率, 是腔场的动态输出. 图 2(b) 右图列出随着上 DBR 对数增加光纤收光效率的变化, 上 DBR 为 14 对时收光效率最高. 由于 FDTD 模拟并未计入 Purcell 增强效应 (即 SQD 发光速率正比于腔内光场的平方), 不能真实反映微腔-SQD 耦合结构的实际光子输出. 为了考虑 Purcell 效应, 在图 2(b) 左图列出微柱内部 (mode inner distribution) 和顶部 (mode top distribution) 的腔模光场静态 (稳态) 分布. 随着上 DBR 对数增加, 腔内光场单调增强而微柱顶部的光场先增强后降低. 兼顾 Purcell 效应 (即腔内光场) 和出光提取效率 (即腔顶部的光场), 则上 DBR 为 16 对时光纤实际收集的 SQD 光子计数率有望最高 (如图 2(b) 中虚线). 我们还模拟了共聚焦物镜的收光效率, 即将上述光纤芯径撤去并将模拟探测器 D 的收光孔径 NA 换成物镜的 $NA = 0.7$. 对于上 DBR 为 16 对的微柱, 共聚焦物镜的收光效率为 67% (与

实验报道的提取效率 $79 \pm 8\%$ ^[16] 或 66% ^[17] 接近), 单模光纤的收光效率较高为 84%, 引入光纤可改善腔内光场分布和出光发散性, 如图 2(a) 静态腔场分布中的白色箭头所示.

半导体/空气界面全反射很强, 使 SQD 整体出光效率不到 4%. 对于上 4 对 DBR 的微腔, 平面腔可保证垂直出光, 但刻蚀微柱引入侧壁的界面全反射 (占主导) 后, 结合顶部的界面全反射, 使腔内为多模弥散光场 (即 $\times 4$ air), 顶部出光发散主要向侧向投影, SQD 发光为全方向, 共聚焦收光效率低 (1.3%), 刻蚀微柱并不能提升共聚焦收光; 光纤粘合引入折射率约 1.5 的介质 (光纤或固化胶) 克服了顶部的界面全反射, 有利于在微柱内形成横向束缚的腔模光场 (即 $\times 4$ fiber) 增强 SQD 发光和垂直出光, 使光纤收光效率达 11%. 光谱测试也发现, 上 4 对 DBR 微柱的光谱单线峰值强度在共聚焦下为 4000/s, 在光纤粘合下最高达 40000/s^[14].

3 实验系统、测量结果及分析

实验上, 采用石英 V 槽排式光纤 (16 芯) 与 DBR 量子点样片通过紫外固化胶盲对粘合大批量制样, 并通过液氮低温光谱筛选得到具有 SQD 光谱

单线输出的光纤耦合样品, 样品 A 为下 20 对/上 4 对 DBR 微柱与 9 μm 芯径普通单模光纤粘合, 微柱直径 3 μm, 阵列周期 10 μm; 样品 B 为下 25 对/上 15 对的 DBR 平面腔样片与 4.4 μm 小芯径单模光纤 HP780 粘合, 目的在于提高 SQD 命中率以验证光纤收光是否能获得高计数率以及小芯径单模光纤是否可用. 该样片之前曾刻蚀微柱 (Q 值约为 3800) 实现共聚焦一阶透镜前单光子计数率最高 16 M/s^[18]. 如前所述, 上 DBR 对数是影响微腔性能的关键, 下 DBR 对数应在满足微腔性能前提下做到节约. 对于光纤粘合消除上 DBR 与空气界面全反射的情况, 样品 A 的上 DBR 为 4 对, 下 DBR 为 20 对, 足以保证垂直向上出光; 样品 B 的上 DBR 为 15 对, 下 DBR 需要至少 25 对, 才能保证垂直向上出光. 920 nm 波段 SQD 片上分布很多, 只要样片区域合适, 盲对粘合总能从 16 根光纤中找到 1—2 根具有较强光谱单线. 更直接的光纤耦合是用单个光纤陶瓷插针通过扫描定位来实现, 例如低温光谱扫描及室温原位粘合, 它在极低密度 SQD 的光纤耦合上有优势, 但目前还需克服以下技术挑战: 压缩机低温冷头振动使光纤端面与量子点样片相互摩擦损坏微柱; 光纤垂直方向性的控制不如直接粘合效果好.

测试采用如图 3 的装置, 样品置于 4 K 压缩低温冷台, 将其光纤大部分塞入热屏蔽罩内进行降温过渡以保证样品温度降到 10 K, 只留末端一小段光纤通过真空胶塞引出, 并用冷接子连接熔融型 650 nm/980 nm 光纤波分复用器进行激发和收光, 光谱测试直接将波分复用器 980 nm 输出端接到光栅成像光谱仪上, 二阶关联函数 $g^2(\tau)$ 测试采用熔融型 1 × 2 单模光纤分路器 (Thorlabs) 分光, 长通滤光片和窄线带通滤光片 (Semrock) 滤光, 光纤准直器和多模光纤收光; 滤光波长可通过调节

窄线滤光片倾角调节, 调节时, 将多模光纤接到成像光谱仪上并转动窄线滤光片实时观测滤光后的光谱. 采用硅雪崩型单光子计数器 Si-APD 实时记录光子计数流, 与时间符合单光子计数模块 TCSPC 结合完成 $g^2(\tau)$ 测试. $\tau = 0$ 的 $g^2(\tau)$ 即 $g^2(0)$, 反映单光子纯度. 需注意, 光栅成像光谱仪滤光后 Si-APD 收集的光信号强度基本与光谱信号强度一致, 与之不同, 上述窄线滤光片滤光后 Si-APD 收集的光信号强度高于光谱信号强度, 因为其不再经过光谱仪光栅衍射. 通过比较滤光前 (即光纤波分复用器输出的光谱强度) 和滤光后 (即多模光纤输出的光谱强度), 得到滤光光路效率为 11%, Si-APD 在 920 nm 波段探测效率为 34%, 光纤波分复用器输出效率为 80%, 因此, APD 实测的单光子计数率仅为单模光纤输出单光子总计数率的 3%, 用于估算后者. 另外, 窄线滤光片滤光不彻底会引入多光子, APD 测到光子计数率中只有 $[1 - g^2(0)]^{1/2}$ 部分来自净单光子计数率^[14]. 样品 A 和样品 B 的测试结果分别如图 4 和图 5 所示. $g^2(\tau)$ 均呈反聚束, 光谱强度与光纤输出单光子计数率具体列于表 1.

如图 4 所示, 样品 A 在 10 K 低温测到细锐谱

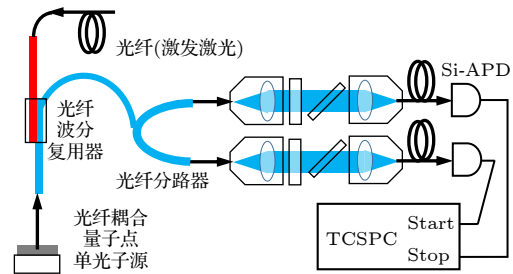


图 3 光纤耦合量子点单光子源的二阶关联函数测试装置
Fig. 3. Measurement setup of second-order correlation function of a fiber-coupled SQD single-photon source.

表 1 样品光纤输出单光子计数率汇总

Table 1. Summary of fiber output single photon count rate of the samples.

样品及温度/K	光谱峰值强度(面积)		单光子计数率			
	原光纤输出/s ⁻¹	滤光后分束单路/s ⁻¹	APD两路实测/(10 ⁶ s ⁻¹)	估算原光纤输出/(10 ⁶ s ⁻¹)	$g^2(0)$	净单光子计数率/(10 ⁶ s ⁻¹)
A(10)	28747(125205)	1608(9911)	0.04	1.3	0.10	1.2
A(77)	12611(626890)	922(38097)	0.13	4.3	0.05	4.1
B(10)	101360(1124015)	7491(71768)	0.32	9.2	0.70	5.0
B(40)	77800(2591945)	9305(186679)	0.88	22.0	0.70	12.0
B(70)	47840(3945870)	6479(277165)	1.10	29.0	0.70	16.0
B(70 ^a)	15121(5604040)	10045(406237)	1.88	47.0	0.80	21.0

注: 在激发功率2.4 μW下测试, 其他未标注的在1.1 μW下测试.

线, 不同波峰的激子归属根据其强度的激发功率依赖性、光谱特征和相对位置来定, X^+ 能量最高、 X 最低, XX 和 X 位于中间; XX_{11} (s 壳层双电子、

单空穴, p 壳层单空穴) 光谱较宽; XXX (s 壳层双电子、双空穴, p 壳层单电子、单空穴) 的激发功率依赖性最高; 高阶激子 XX , XX^+ 和 XXX 的出现是

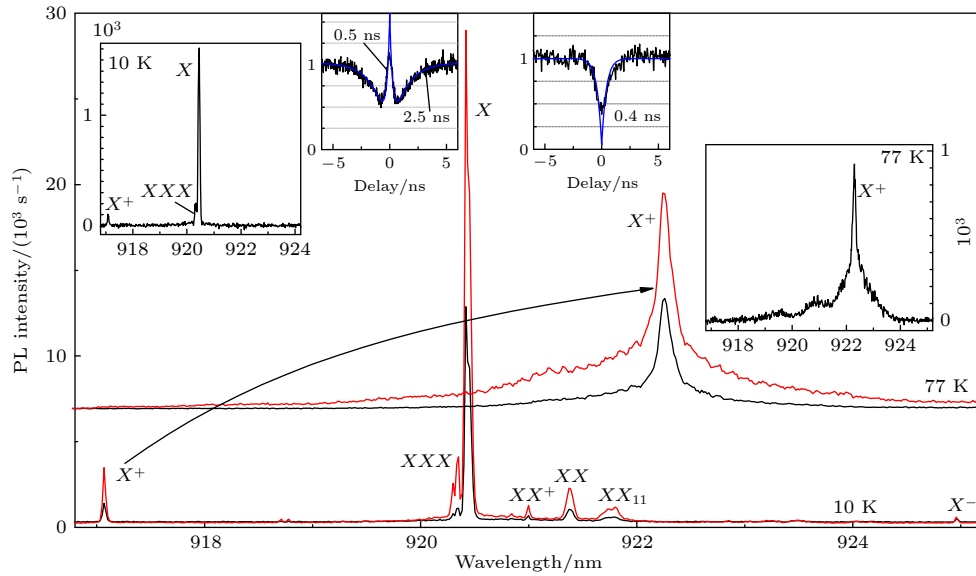


图 4 光纤粘合 SQD 样品 A 的光谱. 分别在 10 和 77 K 下用高 (红线) 和低 (黑线) 激发功率测试; 插图: 滤光后的分束单路光谱和 $g^2(\tau)$ 及退卷积拟合 (蓝线)

Fig. 4. Sample A of fiber coupled SQD, spectra measured at 10 and 77 K under high (red) and low (black) excitation powers. Insets: One-beam spectra after filtering and $g^2(\tau)$ with deconvoluted fitting (blue).

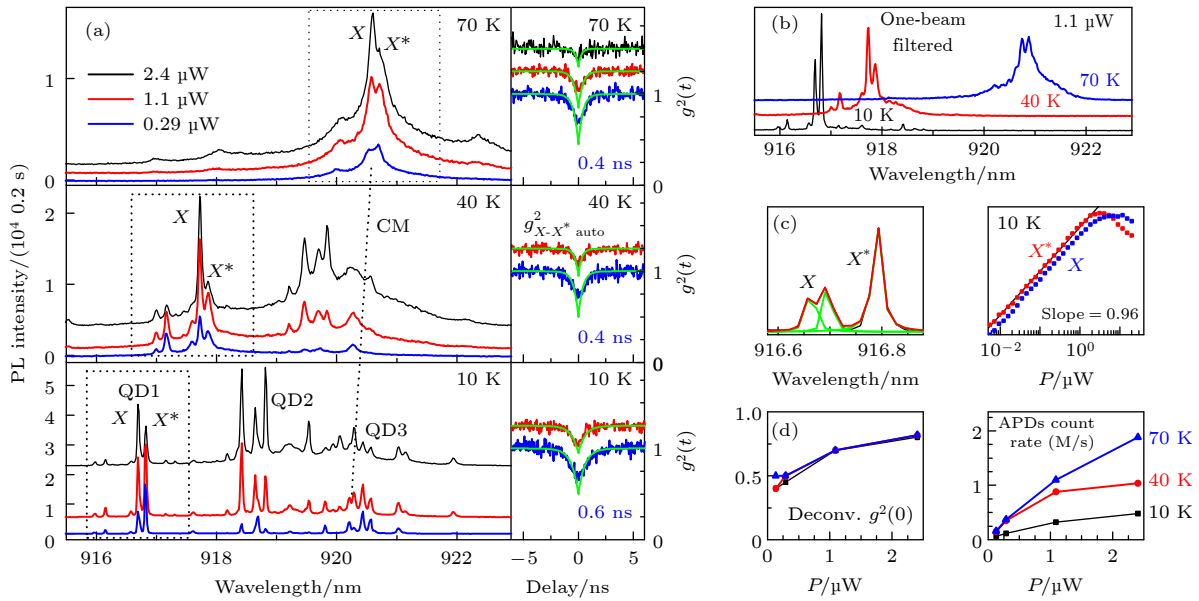


图 5 光纤粘合 SQD 样品 B (a) 光谱 (左) 和 $g^2(\tau)$ 及退卷积拟合 (右), 在 10, 40 和 70 K 下变激发功率测试 (如蓝、红、黑线, 垂直平移以便显示; 虚线示意腔模; 虚线框示意 QD1); (b) 三个温度的滤光后光谱 (1.1 μW 激发功率测试); (c) 10 K 温度下 QD1 的 X/X^* 光谱双线细致结构、强度-激发功率依赖曲线, X 显示劈裂, 如光谱峰拟合绿线; (d) 退卷积 $g^2(\tau)$ 、滤光后 APD 实测光子计数率随激发功率的变化

Fig. 5. Sample B of fiber coupled SQD: (a) PL spectra (left) and $g^2(\tau)$ with deconvoluted fitting (right), measured at 10, 40 and 70 K with variable excitation power (i.e. blue, red and black, offset vertically for clarity; dash line indicates cavity mode, CM, dashed rectangular indicate QD1); (b) spectra after filtering at the three temperatures (measured under excitation power of 1.1 μW); (c) X/X^* peak fine structure and intensity excitation power dependence, X shows splitting as the green spectral fittings indicate; (d) deconvoluted $g^2(\tau)$ and photon count rate at APDs after filtering, as a function of the excitation power.

由于 10 K 低温下 SQD 界面缺陷空穴占据产生内建势使 SQD 电子俘获加快而空穴俘获变慢所致^[19]. X 激子发光为主, 光谱峰值强度达 30000/s, 对应光纤输出单光子计数率 $1.3 \times 10^6/s$ (相同微柱结构的光纤耦合样品曾获得 45000/s 的光谱峰值强度和 $1.8 \times 10^6/s$ 的光纤输出单光子计数率^[14]); 滤出该谱线 (如左侧插图光谱) 并测试 $g^2(\tau)$, 呈现反聚束包络上一个聚束峰, 说明除包括主要的 X 激子发光外还包括一小部分 XXX 激子发光, 聚束峰对应 $XXX-X$ 级联, 其拟合时间 2.5 ns 为 XXX 的载流子布居时间, 0.5 ns 为 XXX 的荧光寿命, X 的荧光寿命估计为 1 ns (即 XXX 荧光寿命的 2 倍). 77 K 下因界面缺陷不再空穴占据产生内建势, 高阶激子消失, GaAs 中的过剩空穴进入 SQD, X^+ 发光为主而 X 消失^[19], 该谱线退卷积 $g^2(0) = 0.05$, 拟合发光寿命为 0.4 ns (因 X^+ 红移 5 nm 与光腔耦合增强, 且受声子散射影响), 单光子光纤输出计数率估算可达 $4.1 \times 10^6/s$, 具体见表 1.

如图 5, 从光谱可见, 样品 B 至少有 4 个 SQD. 我们研究 QD1, 它以 X/X^* 发光为主, 其激发功率依赖斜率均为 0.96 证明是单激子; X 精细劈裂约 49 μeV , X^* 无劈裂, 仅在 10 K 低温且低激发功率 (0.29 μW) 下占主导, 可能与界面缺陷空穴占据并与量子点 s 电子复合发光有关^[20]. X/X^* 光谱双线很难分开, 故同时将其滤出做二阶自关联 $g_{X-X^*}^2(\tau)$ 测试. 测得的 $g^2(0)$ 最低为 0.4, 原因是 X 和 X^* 强度相当, 自关联里包含很大的互关联成分^[19]. X/X^* 的拟合发光寿命 (激发功率 0.29 μW 下) 在 10 K 下为 0.6 ns, 在 40—70 K 下受光腔耦合增强为 0.4 ns; 70 K 下 X/X^* 光谱双线与 DBR 腔模 CM 重合, 只看到 QD1 发光; 其谱线声子展宽、峰值变弱但整体强度提高, 根据估计 (详见表 1), 光纤输出的净单光子计数率最高达 16 M/s (激发功率 1.1 μW 下测得, 此时 $g^2(0) = 0.7$) 或 21 M/s (激发功率 2.4 μW 下测得, 此时 $g^2(0) = 0.8$), 与该样品之前在共聚焦收光下一阶透镜前的单光子最高计数率 16 M/s (腔模共振时)^[18] 相当, 反映较高的光纤收光效率, 远高于共聚焦实际收光计数率 3.3 M/s (即 APD 计数率除以探测效率), 也高于之前不同介质膜构成 DBR F-P 腔的光纤收光效率 10%^[15]. 较高 $g^2(0)$ 反映滤光不彻底 (如图 5 上); 样品 B 未刻蚀微柱显示较多 SQD 发光. 在 10 K

下谱线呈现等间距特征, 反映光纤端面与 DBR 样品间由于填充紫外固化胶 (折射率 1.56^[21], 厚度约几个微米) 构成 F-P 标准具的多重模特征. 在 10 K 下激发功率 1.1 μW 时样品 B 的光纤输出净单光子计数率为 5.0 M/s (如表 1), 高于样品 A (1.3 M/s); 在 70 K 下腔模耦合使 SQD 发光增强, 获得约 20 M/s 光纤输出净单光子计数率, 也高于样品 A (4.1 M/s), 符合 FDTD 模拟结果.

未来优化方向是: 对上 16 对 DBR 平面腔样品刻蚀微柱用于粘合, 从而空间隔离 SQD 并引入侧向光学限制, 减小光纤覆盖 SQD 数量, 降低两者间 F-P 标准具效应; 优化单个光纤陶瓷插针与 SQD 样品扫描对准粘接工艺; 探索将微柱从衬底剥离转移形成透明样品然后在显微镜下与光纤芯径精确对准粘接的工艺.

4 结 论

综上, 我们实验实现了光纤耦合 SQD 样品, 其光纤输出单光子计数率最高达 20 M/s 量级, 同时保证反聚束性; 多对数 DBR 腔 (样品 B) 的光纤收光比少对数 DBR 腔 (样品 A) 高出几倍, 符合仿真模拟结果. 模拟发现, 对于少对数 DBR 微柱, 光纤粘合降低顶部的界面全反射, 有利于形成横向束缚光场以提升 SQD 垂直出光; 对于多对数 DBR 微柱, 光纤粘合可改善腔内光场分布和出光发散性, 有望获得比共聚焦更高的实际输出计数率. 对多对数 DBR 样品刻蚀微柱使 SQD 空间隔离, 减小光纤覆盖 SQD 数量以及光纤端面产生的标准具效应, 将有望获得高输出计数率的干净光谱单线.

参考文献

- [1] Wang H, He Y, Li Y H, Su Z E, Li B, Huang H L, Ding X, Chen M C, Liu C, Qin J, Li J P, He Y M, Schneider C, Kamp M, Peng C Z, Hofling S, Lu C Y, Pan J W 2017 *Nat. Photonics* **11** 361
- [2] Pooley M A, Ellis D J P, Patel R B, Bennett A J, Chan K H A, Farrer I, Ritchie D A, Shields A J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 211103
- [3] Feng L, Zhang M, Xiong X, Chen Y, Wu H, Li M, Guo G P, Guo G C, Dai D X, Ren X F 2019 *npj Quant. Inform.* **5** 2
- [4] Lu L, Xia L, Chen Z, Chen L, Yu T, Tao T, Ma W, Pan Y, Cai X, Lu Y, Zhu S, Ma X 2020 *npj Quant. Inform.* **6** 30
- [5] Paesani S, Borghi M, Signorini S, Maïnos A, Pavesi L, Laing A 2020 *Nat. Commun.* **11** 2505
- [6] Wu R, Lin J, Wang M, Fang Z, Chu W, Zhang J, Zhou J, Cheng Y 2019 *Opt. Lett.* **44** 4698

- [7] Qiang X, Zhou X, Wang J, Wilkes C M, Loke T, Gara S O, Kling L, Marshall G D, Santagati R, Ralph T C, Wang J B, O'Brien J L, Thompson M G, Matthews J C F 2018 *Nat. Photonics* **12** 534
- [8] Najafi F, Mower J, Harris N C, Bellei F, Dane A, Lee C, Hu X, Kharel P, Marsili F, Assefa S, Berggren K K, Englund D 2015 *Nat. Commun.* **6** 5873
- [9] Zhang G, Haw J Y, Cai H, Xu F, Assad S M, Fitzsimons J F, Zhou X, Zhang Y, Yu S, Wu J, Ser W, Kwek L C, Liu A Q 2016 *Optica* **3** 1274
- [10] Chen Z S, Ma B, Shang X J, Ni H Q, Wang J L, Niu Z C 2017 *Nanoscale Res. Lett.* **12** 378
- [11] Lee C M, Lim H J, Schneider C, Maier S, Hofling S, Kamp M, Lee Y H 2015 *Sci. Rep.* **5** 14309
- [12] Davanco M I, Rakher M T, Wegscheider W, Schuh D, Badolato A, Srinivasan K 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 121101
- [13] Chonan S, Kato S, Aoki T 2014 *Sci. Rep.* **4** 4785
- [14] Ma B, Chen Z S, Wei S H, Shang X J, Ni H Q, Niu Z C 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 142104
- [15] Muller A, Flagg E B, Metcalfe M, Lawall J, Solomon G S 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 173101
- [16] Gazzano O, Vasconcellos S M, Arnold C, Nowak A, Galopin E, Sagnes I, Lanco L, Lemaitre A, Senellart P 2013 *Nat. Commun.* **4** 1425
- [17] Ding X, He Y M, Duan Z C, Gregersen N, Chen M C, Unsleber S, Maier S, Schneider C, Kamp M, Hofling S, Lu C Y, Pan J W 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 020401
- [18] Li S L, Chen Y, Shang X J, Yu Y, Yang J W, Huang J H, Su X B, Shen J X, Sun B Q, Ni H Q, Su X L, Wang K Y, Niu Z C 2020 *Nanoscale Res. Lett.* **15** 145
- [19] Shang X J, Ma B, Ni H Q, Chen Z S, Li S L, Chen Y, He X W, Su X L, Shi Y J, Niu Z C 2020 *AIP Adv.* **10** 085126
- [20] Makhov I S, Panevin V Y, Sofronov A N, Firsov D A, Vorobjev L E, Vinnichenko M Y, Vasil'ev A P, Maleev N A 2017 *Superlattices and Microstruct.* **112** 79
- [21] Typical Properties of Norland Optical Adhesive (NOA) 61, Norland Products Inc. www.norlandprod.com/adhesives/NOA%2061.html [2020-12-10]

Optical fiber coupling of quantum dot single photon sources^{*}

Shang Xiang-Jun¹⁾ Li Shu-Lun¹⁾ Ma Ben¹⁾ Chen Yao¹⁾He Xiao-Wu¹⁾ Ni Hai-Qiao¹⁾²⁾ Niu Zhi-Chuan^{1)2)†}

1) (*State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

2) (*Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China*)

(Received 28 September 2020; revised manuscript received 15 December 2020)

Abstract

Semiconductor quantum dot (QD) at low temperature will create excitons with sharp spectral lines for single photon emission. Optical fiber coupling avoids scanning for positioning and vibration influence in low-temperature confocal setup, and is a key technology in realizing the plug-play and componentization of QD single photon sources. For the fiber coupling techniques, the lateral coupling of a photonic crystal cavity or waveguide with a tapered fiber, or normal coupling of a QD chip with a tapered facet fiber in a large numerical aperture has been developed based on mask in a micro-region; however, the above techniques require multi-dimensional precise adjusting in order to avoid abnormally bending a soft fiber to realize alignment and high-efficiency coupling. Ceramic ferrule or silica V-shaped groove-mounted fiber has a large smooth facet and no bending; it can collect light in the normal direction by being aligned with bonding QD chip; V-shaped groove-mounted fiber array also enables a random adhesion and avoid scanning for alignment, which is simple in technique. This work is based on the previous realization of single photon output by random adhesion of few-pair DBR micropillar chip with V-shaped groove-mounted fiber array, and uses many-pair DBR cavity chip with theoretical simulation optimization to improve the normal light extraction and its fiber collection efficiency, and greatly improves the fiber output of single photon count rate.

Keywords: quantum dot single photon source, optical fiber coupling, distributed Bragg reflector cavity, light normal extraction

PACS: 78.67.Hc, 73.21.La, 78.55.Cr, 42.50.Ar

DOI: 10.7498/aps.70.20201605

^{*} Project supported by the National Key R & D Program of China (Grant Nos. 2018YFB2200504, 2018YFA0306100), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61505196), and the Scientific Instrument Developing Project of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. YJKYYQ20170032).

[†] Corresponding author. E-mail: zniu@semi.ac.cn